

平成24年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「シリコンウエハのスライス加工に対応したレーザー加工システムの開発」

研究開発成果等報告書

平成25年 3月

委託者 関東経済産業局

委託先 財団法人埼玉県産業振興公社

目次

第1章	研究開発の概要	2
1-1	研究開発の背景・研究目的及び目標	2
1-2	研究体制	6
1-3	成果概要	10
1-4	当該研究開発の連絡窓口	12
第2章	本論	13
①	加工技術の最適化研究	13
②	薄化ウエハ品質評価技術	20
③	シリコン内部を高精度に加工可能な光学技術の組み込み開発	24
④	位置の安定化機構技術の組み込み開発	25
⑤	試験試作装置の設計と製作	26
⑥	加工高速化機器の組み込み開発	27
第3章	総括	31

第1章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

太陽光発電パネルや半導体デバイスの主要部材であるシリコンウエハは、インゴットからマルチワイヤーソーによりスライス加工され、デバイス用途ではその後、研削・研磨加工を経て薄化されている。この加工プロセスにおいてシリコンの50%~90%は加工屑となってしまうのが現状である。一方、図1に示すように、2008年度のシリコンウエハ市場規模は、電子デバイス市場で200mm、300mmウエハ合計で1,000万枚/月、太陽電池の国内生産市場では100万枚/月の需要がそれぞれあり、これらシリコンウエハ合計で1,100万枚/月の規模であったとされる。今後も需要拡大が予想されるシリコンウエハは、需要増に対応した材料の安定供給という課題を抱えており、材料ロス低減による資源の有効利用が必要である。

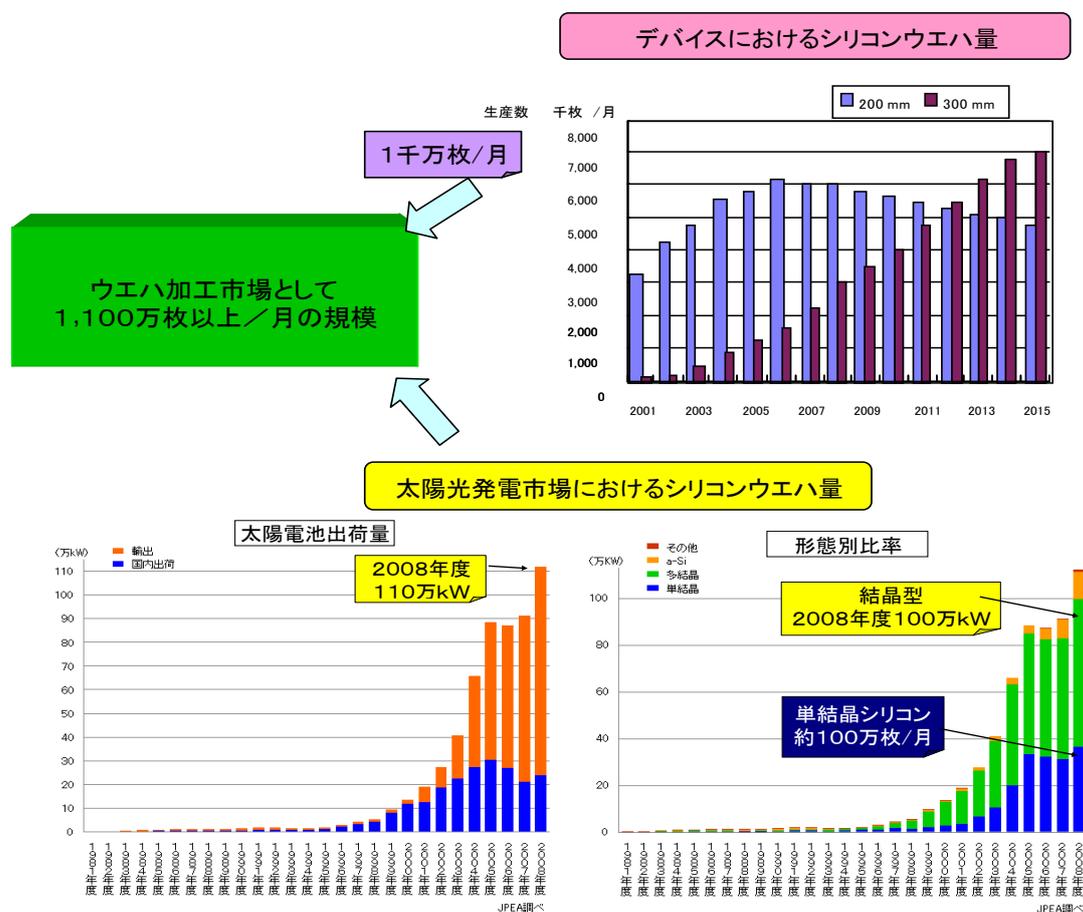


図1 シリコンウエハ市場規模

エコ社会実現に向けた太陽光発電の一層の導入拡大には、発電コストの低減が課題である。その中で、長年の実績と高変換効率を有する結晶型シリコン太陽電池の役割は大きい。図2に示すようにモジュールコストの40%近くをシリコンが占めており、コストダウンにはシリコンの薄化による原料使用量削減が課題であり、加工屑を低減させてウエハ薄化を可能とする新たな加工技術が求められている。また、半導体デバイスにおいては、高度情報化社会に向け、半導体メモリーの高速化、大容量化の要求が高まっており、複数チップを貫通電極にて接続する3次元実装技術の確立が要求されており、ここでも薄化ウエハは必然である。

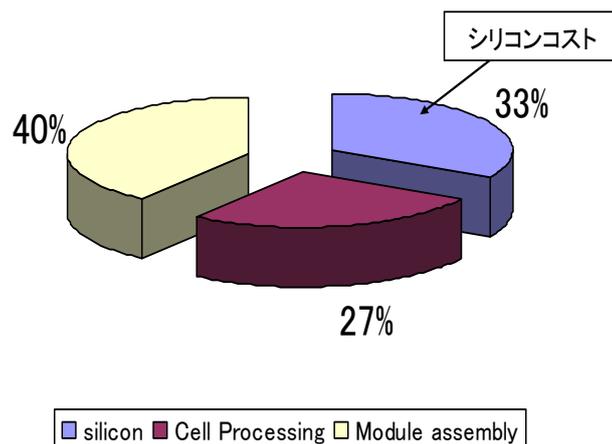


図2 結晶型シリコン太陽電池のコスト構成比率

このように、シリコンウエハの新たなスライス加工技術は、太陽光発電産業および半導体デバイス産業においてコストダウンとともに国際競争力を高めること及びエコ社会実現に大きく貢献できる技術として、そのニーズは大きい。

上記の背景を踏まえた本研究の高度化目標は、機械加工であるマルチワイヤーソーを利用するプロセスと同レベル以上の生産性でシリコンウエハを切り出し可能な手段として、レーザーを使った新しい加工原理に基づく新たな高精度・微細加工手段を開発することであり、具体的にはシリコン内部へのレーザー照射による加工痕形成技術を利用したシリコンウエハの新たなスライス加工システムであり、この加工システムにより従来のマルチワイヤーソーによる加工では実現が困難である加工屑を低減してのウエハ薄化を可能とするものである。本研究の新技术と従来のマルチワイヤーソー方式との対比を図3に示す。

この加工システムは信越ポリマーと埼玉大学の研究成果であるシリコン内部へのレーザー照射による3mm×3mm試料の薄化技術を基盤技術として用いる。本加工技術はシリコンを透過し易いYAGレーザー（基本波1064nm）を用いてシリコン内部に焦点を絞り、ウエハ表面と平行方向に内部加工してウエハ面積を変化させずにウエハを剥離によって作製していくことを基本原理としており、これまで信越ポリマーと埼玉大学では625μm厚のシリコンウエハに対して、ここからウエハを切り出すことを目指して研究を行ってきた。

具体的には、図4に示す加工実験装置でQスイッチYAGレーザーを用いてシリコン内部に焦点を絞り照射実験を行った（図5）。その際、レーザービームを1回走査することでシリコン内部に光軸に沿ったクラック部が形成されることを確認した。しかし、ウエハの表裏面に達するほど大きなクラックは確認できなかった。さらにビームをピッチ1μmで往復走査させ面加工を行った実験では、内部のクラックはウエハ表面に対して平行に広がることを発見した。これにより、図6に示すように3mm×3mmのシリコンウエハを2枚に薄化することができた。

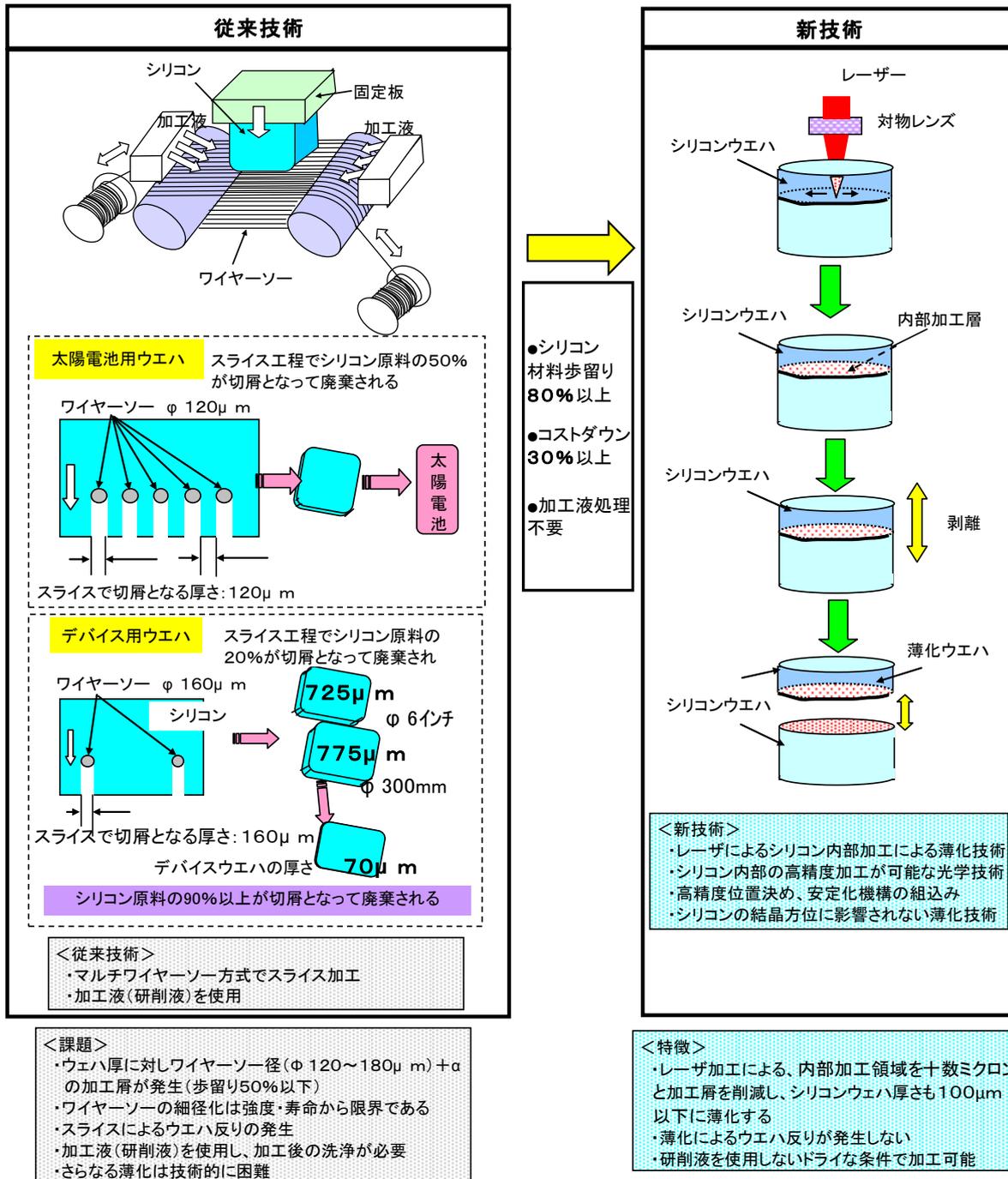


図3 本研究における新技術と従来技術の対比

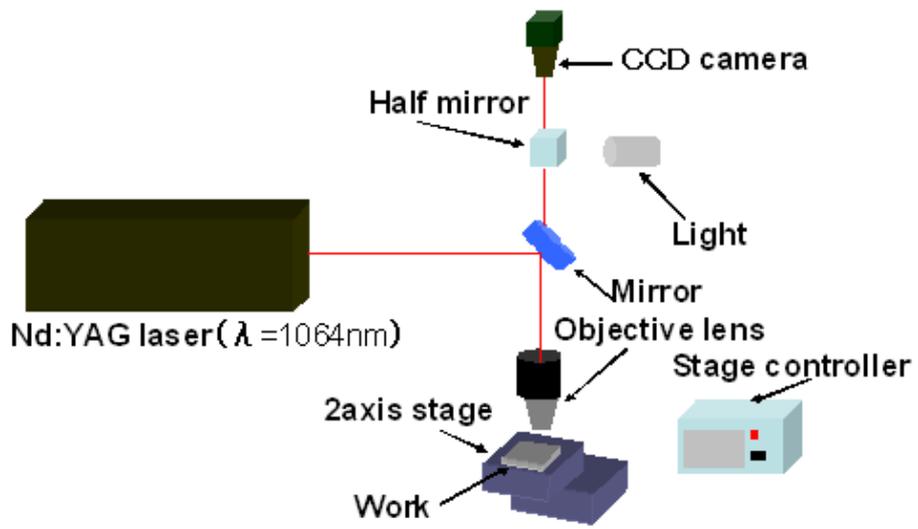


図4 加工実験装置の概要図

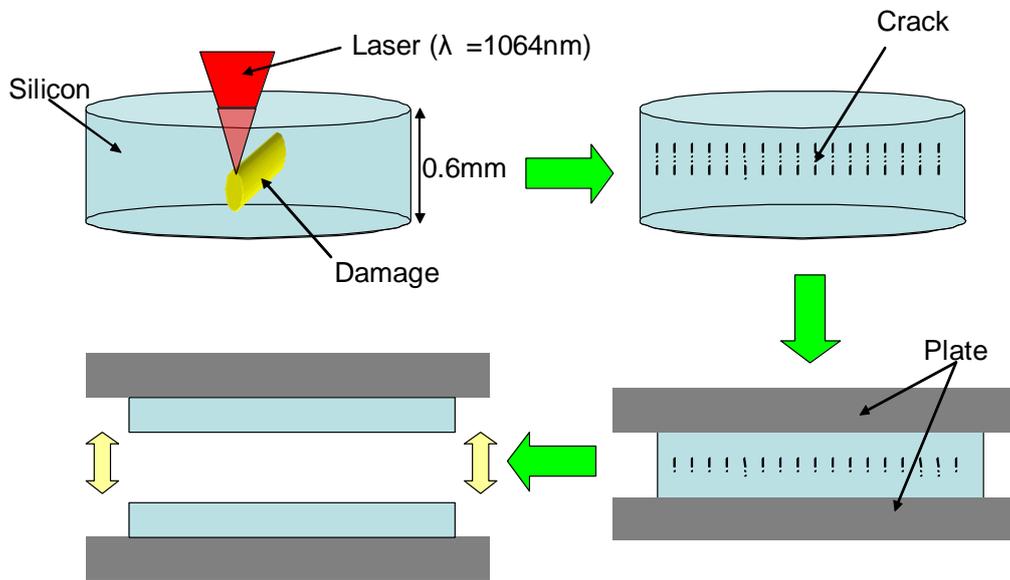


図5 内部加工と剥離のプロセス

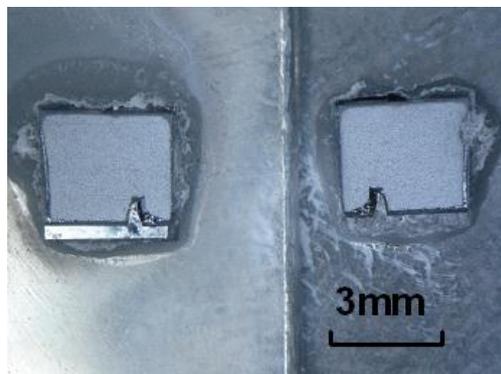


図6 実験で剥離したシリコン

シリコンの内部加工では、すでに浜松ホトニクスが開発した「ステルスダイシング」が知られている。これはシリコンウエハを細かく分割（ウエハ表面と垂直方向）するための手法であり、レーザーで形成した内部欠陥からウエハ表裏にクラックを進展させることを基本原理としている。したがって、本薄化技術とは加工方向は90°異なっている。上記のように本技術開発過程で、シリコン表面と平行して内部加工を隣接していくと平行方向にクラックが連結し面加工が可能となることを発見した。よって、レーザーを用いた本加工技術は新規性にあふれた独創的技術であり世界初の技術である。

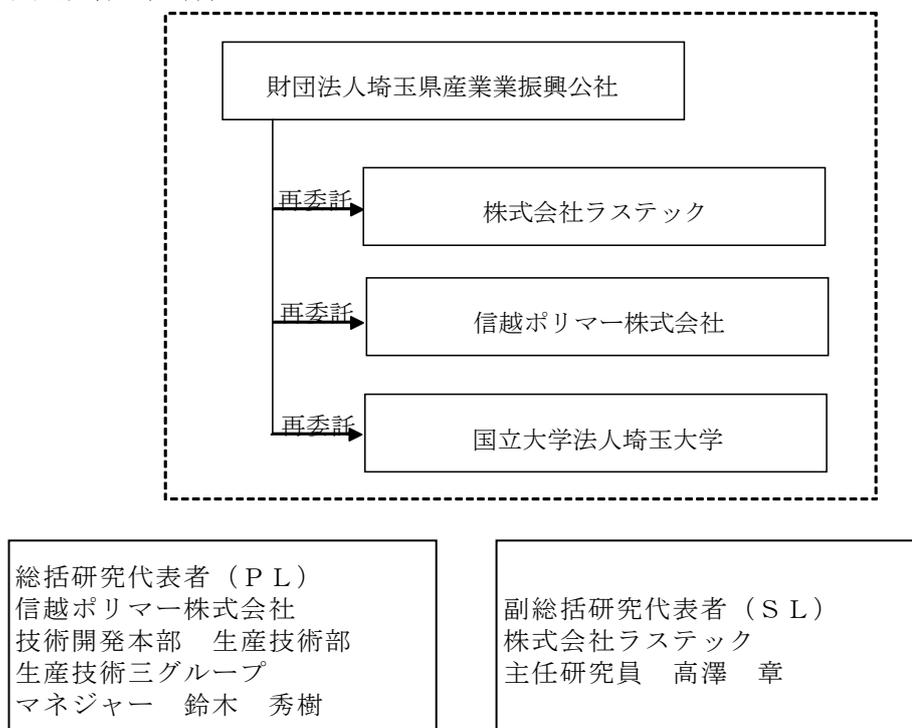
本研究開発では上記の基盤技術に基づくシリコンウエハのスライス加工に対応したレーザー加工装置の試験試作装置の開発とその実用化検証を目標とし、シリコン内部加工技術の研究開発と試験試作装置の開発を以下のサブテーマを設定し、課題解決に取り組んだ。

- ① 加工条件の最適化研究
(実施：埼玉大学、信越ポリマー(株)、(株)ラステック)
- ② 薄化ウエハ品質評価技術 (実施：埼玉大学、信越ポリマー(株))。
- ③ シリコン内部を高精度に加工可能な光学技術の組み込み開発
(実施：(株)ラステック、埼玉大学、信越ポリマー(株))
- ④ 位置の安定化機構技術の組み込み開発
(実施：(株)ラステック、埼玉大学、信越ポリマー(株))
- ⑤ 試験試作装置の設計と製作 (実施：(株)ラステック)
- ⑥ 加工高速化機構の組み込み開発 (実施：(株)ラステック、信越ポリマー(株)、埼玉大学)
- ⑦ プロジェクトの管理・運営 (実施：財団法人埼玉県中小企業振興公社)

1-2 研究体制

(1) 研究組織・管理体制

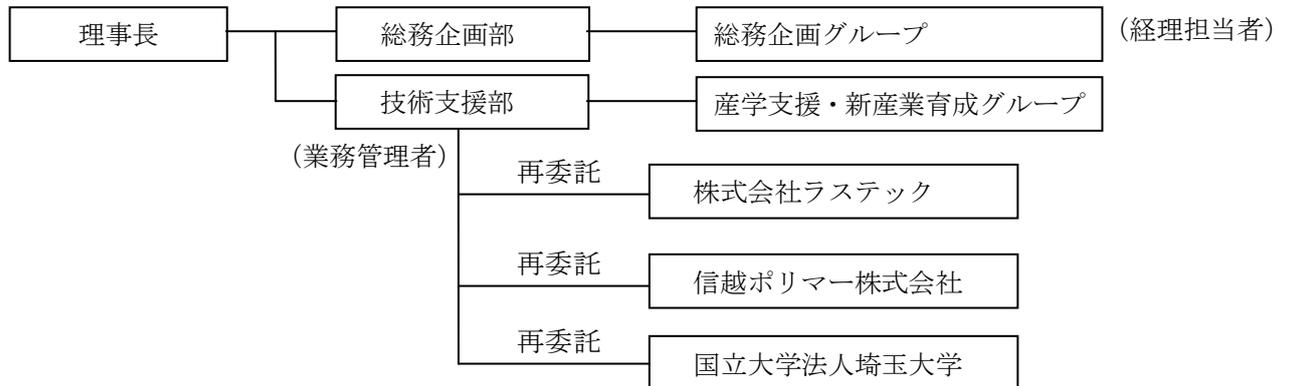
1) 研究組織 (全体)



2) 管理体制

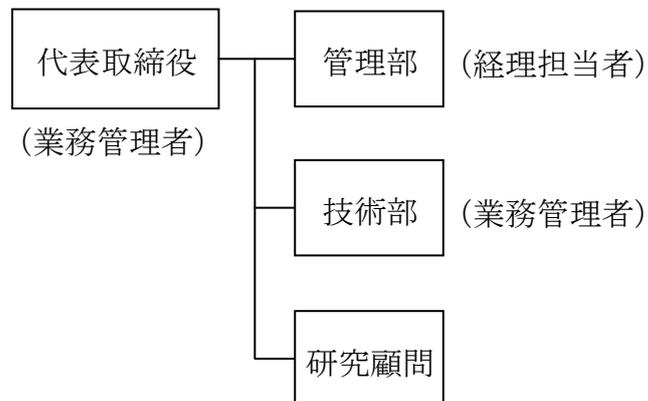
① 事業管理機関

【財団法人埼玉県産業振興公社】

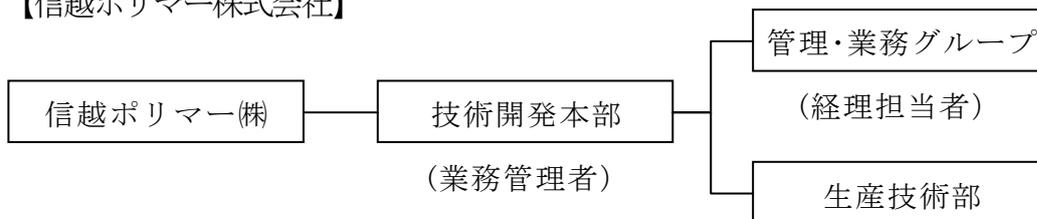


② 再委託先

【株式会社ラステック】



【信越ポリマー株式会社】



【国立大学法人埼玉大学】



(2) 管理員及び研究員

【事業管理機関】 財団法人埼玉県産業振興公社
管理員

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
五十嵐 久夫	総務企画部 総務企画部グループ 主査	⑦
加藤 匠	技術支援部 産学支援・新産業育成グループ 上級主事	⑦

【再委託先】

研究員
株式会社ラステック

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
小泉 俊郎	代表取締役	①、③、④、⑤、⑥
高澤 章	主任研究員	①、③、④、⑤、⑥
三木 直樹	研究員	①、③、④、⑤、⑥
鈴木 剛	研究員	①、③、④、⑤、⑥
小山 栄紀	研究員	①、③、④、⑤、⑥
豊田 浩一	研究顧問	①、③、④、⑤、⑥

信越ポリマー株式会社

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
鈴木 秀樹	技術開発本部 生産技術部 生産技術三グループ マネジャー	①、②、④、⑥
松尾 利香	技術開発本部 生産技術部 生産技術三グループ	①、②、④、⑥
篠塚 信裕	技術開発本部 生産技術部 生産技術三グループ	①、②、④、⑥

国立大学法人埼玉大学

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
池野 順一	大学院理工学研究科 教授	①、②、④、⑥
澁谷 秀雄	大学院理工学研究科 助教	①、②、④、⑥

(3) 経理担当者及び事業管理者の所属、氏名

【事業管理機関】

財団法人埼玉県産業振興公社

(経理担当者) 総務企画部 総務企画グループ 主査 五十嵐 久夫

(業務管理者) 技術支援部 部長 中島 規之

【再委託先】

株式会社ラステック

(経理担当者) 管理部 小泉 真弓

(業務管理者) 代表取締役 小泉 俊郎、技術部 高澤 章

信越ポリマー株式会社

(経理担当者) 管理・業務グループ 松尾 美和

(業務管理者) 業務・管理グループ マネジャー 高木 信哉

国立大学法人埼玉大学

(経理担当者) 財務部経理課契約第2係 係長 中島 弘樹

(業務管理者) 大学院理工学研究科 研究科長 山口 宏樹

(4) 他からの指導・協力者

研究開発推進委員会 委員

氏名	所属・役職
鈴木 秀樹	信越ポリマー株式会社 技術開発本部 生産技術部 生産技術三グループ マネジャー
高澤 章	株式会社ラステック 主任研究員
小泉 俊郎	株式会社ラステック 代表取締役
三木 直樹	株式会社ラステック 研究員
豊田 浩一	株式会社ラステック 研究顧問
国司 洋介	信越ポリマー株式会社
松尾 利香	信越ポリマー株式会社
篠塚 信裕	信越ポリマー株式会社
池野 順一	国立大学法人埼玉大学 大学院 理工学研究科 教授
澁谷 秀雄	国立大学法人埼玉大学 大学院 理工学研究科 助教
加藤 匠	財団法人埼玉県産業振興公社 技術支援部 産学支援・新産業育成グループ 上級主事
近藤 拓士	財団法人埼玉県産業振興公社産学コーディネーター

1-3 成果概要

① 加工条件の最適化研究

開発する試験試作装置での加工条件に反映させることを目的に、既存の加工実験装置を利用した加工実験を実施し、レーザービーム特性と加工後の剥離状態との相関を明らかにし、標準的加工条件の設定に至った。

試験試作装置に組み込むレーザー機種選定にあたり、3メーカー6機種を評価した。事業化に向けた課題であるシリコン内部の改質層の厚さ(材料ロス)の低減、加工時間、大面積材料の安定加工、高速化を考慮して、レーザー加工によるシリコン内部加工可否のみならずウエハが剥離可能な加工状態が得られる機種の選定が必要であった。これら観点に基づく実験結果および機器仕様から、イエナオプティック社製「JenLas fiber ns 20 Advanced single mode」を選定した。加工高速化技術として最も有効と考えられる多点同時加工を考慮して、購入台数を計画変更により2台から3台へ増台した。一方で、ステージ装置、シリコン加工用光学機器、除振装置、レーザー評価用機器および安定化用機構用機器で構成される試験試作装置を埼玉大学に設置し、加工実験によりこれら機器の性能評価を実施し、加工実験装置で得られた加工条件を反映させ最適加工条件を追求した。

シリコン加工用光学機器(集光光学素子)に備えた収差補正機能を利用することで集光性能が向上し、剥離に必要なレーザー照射間隔の拡大と改質層厚さ低減(20 μ m前後)および剥離荷重低減の効果が得られた。その結果、50mm \times 50mmサイズの単結晶シリコンウエハを剥離させることができた。レーザー照射間隔の拡大は加工高速化に有用な条件となる。

② 薄化ウエハ品質評価技術

上記①の加工実験により得られた薄化ウエハの品質状態を、ラマン分光分析・電子顕微鏡観察などにより欠陥有無・結晶状態・応力分布などの評価・解析を実施した。さらに、剥離後のシリコンウエハ品質について加工面精度を測定した。

シリコンウエハ内部へのレーザー照射により、レーザービームが透過した部分のウエハ品質に与える影響を解析した。エッチング処理後の加工断面を走査型電子顕微鏡(SEM)により観察したが、ビーム透過部分に欠陥などがみられず、レーザー照射による品質への影響がないことが分かった。また、ラマン分光分析を行い、シリコンウエハ断面方向の解析を行った。解析結果から、加工領域は多結晶状態で、圧縮方向の応力が生じていることが推測された。また、加工領域と非加工領域との境界の結晶状態の変化は緩やかであると考えられる。さらに、加工領域の断面方向で比較するとレーザー照射方向面側の方で多結晶化が進んでいることも考えられた。一方、レーザー透過部分は単結晶状態が維持されており、この結果からもレーザー照射による影響が無いことが分かった。

③ シリコン内部を高精度に加工可能な光学技術の組込み開発

シリコンウエハのスライス加工を少ない材料ロス(切りしろ)で行なうことが実用上の課題であり、そのために、ウエハ内部における加工ビームの集光スポットサイズをできるだけ小さくする必要がある。材料内部のレーザー加工においては、加工ビームが大気中から材料内部へ入射する時に生じる屈折により、屈折率の大きい材料ほど、ビームの集光特性が劣化し、加工品質と加工効率の両者に悪影響を与える問題がある。また、切りしろを減らすために開口数の大きい集光系を用いるほど、この影響は顕著になる。そこで、この課題を解決するために、シリコンウエハのレーザースライス用途に特化した、シリコン加工用光学機器を開発し、上記の加工技術の研究開発成果に反映させた。

④ 位置の安定化機構技術の組み込み開発

加工ビームの集光スポットの高精度制御を行なうと、加工対象のシリコンウエハのわずかな傾きや、加工ステージの動作ずれが加工精度に悪影響を与える可能性がある。この問題を解決するために、ステージ装置の移動精度を補うための手段として、加工位置の安定化機構技術を開発した。これは、(1) 加工ビームの光軸とステージ装置の移動方向の位置関係を補正するためのウエハ傾き量の検出機構と、(2) 加工中に加工ビームの焦点位置をシリコンウエハ表面から一定の内部深さにアクティブに保持するためのオートフォーカス機構から成る。

一方で、導入した高移動精度のエアベアリングリニアステージ装置を加工に用いることにより、オートフォーカス機構によるアクティブな補正を行なわない場合でも、従来の加工実験と比較してより大きい加工エリアに対しても、剥離プロセスに必要な加工精度が得ることができると、平成23年度に実験的知見として新たに得られた。

⑤ 試験試作装置の設計と製作

レーザー評価用機器、シリコン加工用光学機器、安定化機構用機器、加工高速化用機器などの加工要素技術、およびステージ装置、レーザー機器を組み込むための詳細設計ならびにソフトウェア開発を行い、試験試作装置を組上げた。

⑥ 加工高速化機構の組み込み開発

レーザー加工工程における効率向上を目的として、加工高速化用機器が開発された。この機器をレーザー加工試験試作装置へ組み込むことにより、試験試作装置の高機能化を実施した。また、加工高速化用機器は最大3台のレーザー機器と共に運用されるため、機器導入と同時に進められたレーザー機器の増設に対応するため、試験試作装置内部の加工ビーム取り回し変更のための光学部材のレイアウト検討を行なった。その後、装置内部の整備作業を実施した。加えて、試験試作装置制御用ソフトウェアのアップグレード作業を実施し、装置を完成させた。試験試作装置概要を図7に示す。完成した試験試作装置の外観写真を図7に示す。

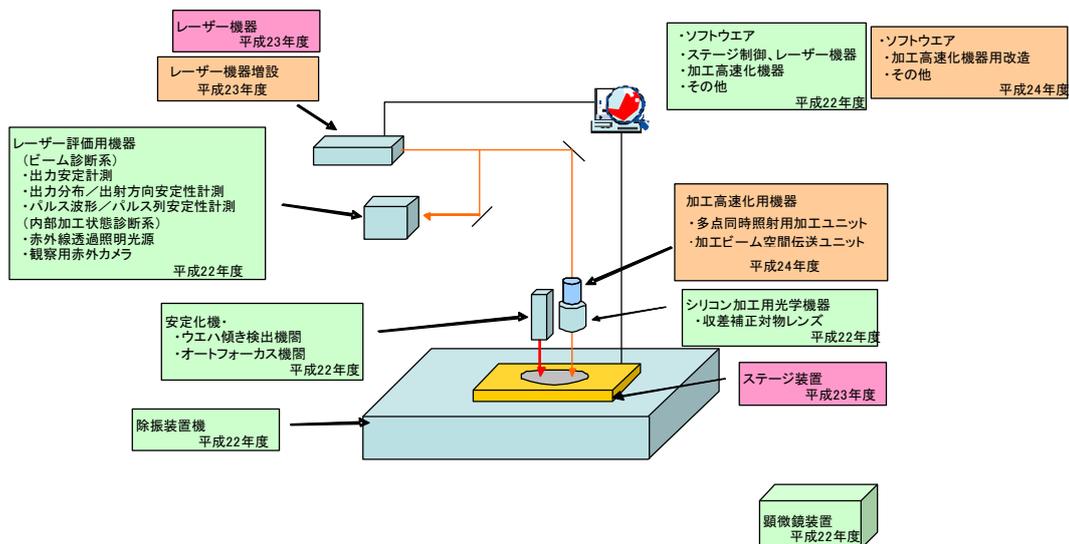


図7 試験試作装置の概要

⑦ プロジェクトの管理・運営

研究開発委員会を適宜開催し、(株)ラステック、信越ポリマー(株)、埼玉大学、埼玉県産業振興公社の四者で研究進捗状況を協議しながら研究開発を進めた。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

(管理法人)

財団法人埼玉県産業振興公社

技術支援部 新産業育成グループ 上級主事 加藤 匠

〒338-0001 埼玉県さいたま市中央区上落合二丁目3番2号

TEL 048-857-3901 FAX 048-857-3921

E-mail kato.takumi@saitama-j.or.jp

(統括研究代表者)

信越ポリマー株式会社

技術開発本部 生産技術部 生産技術三グループ マネジャー 鈴木 秀樹

〒331-0811 埼玉県さいたま市北区吉野町一丁目406-1

TEL 048-652-5943 FAX 048-663-4214

E-mail hsuzuki@shinpoly.co.jp

第2章 本論

① 加工条件の最適化研究

レーザービーム特性と加工後の剥離状態との相関を明らかにし、開発する試験試作装置における加工条件に反映させることを目的に、既存の加工実験装置を利用して加工実験を実施した。レーザー発振器および加工ステージは、研究実施場所である埼玉大学が保有する加工実験装置を利用した。

レーザー発振器としてQスイッチYAGレーザー（波長：1064nm、パルス幅10ns、繰返し周波数10kHz）、対物レンズに可視光用対物レンズ（NA=0.8、倍率：100倍）を用いて、単結晶シリコンウエハ（厚さ：625 μ m、面方位：（100））に対する加工実験を行った。図8に加工痕の観察方法を示す。

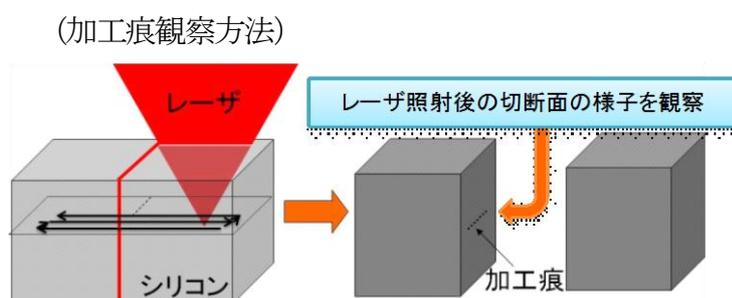


図8 レーザー加工によるシリコンウエハ内部の加工痕形成

このレーザー照射条件を基に、表1に示す加工条件①で、XYステージ上の単結晶シリコンウエハ内部70 μ mにレーザー焦点を合わせ、繰返し周波数10kHzにてレーザービーム中心がこの繰返し周波数とステージ移動速度との関係からX軸方向に1 μ m間隔となるように照射し、Y軸方向の間隔を1 μ m～10 μ mに設定して面加工を行った。

内部に形成された加工層の結晶状態をX線回折(XRD)により調査した結果を図9に示す。このチャートから分かるように加工層は多結晶状態になっていることが確認された。

表1 レーザー加工条件①

加工試料	単結晶シリコンウエハ 625 μ m厚 面方位（100）
レーザー発振器	ランプ励起 YAGパルスレーザー
波長	1064nm
パルス幅	10ns
繰返し周波数	10kHz
レーザー出力	0.68W
対物レンズ	100倍/可視光用
対物レンズ開口数NA	0.8
内部焦点	空气中でシリコン表面から 70 μ m
ステージ送り速度	10mm/s～100mm/s
加工ピッチ	1 μ m～10 μ m

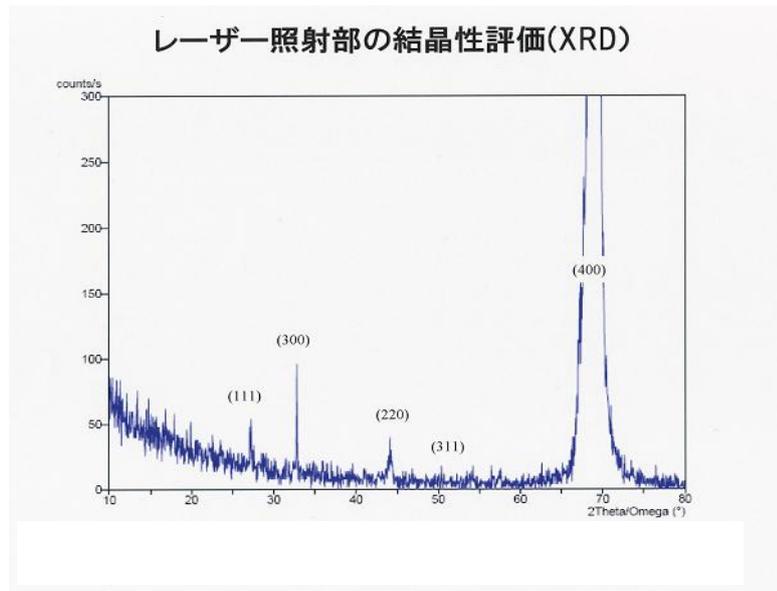


図9 加工層の結晶状態の X 線回折 (XRD)

次に、多結晶シリコンが単結晶シリコンとのエッチング速度差により多結晶部分が先にエッチング除去される性質を利用して、加工試料をエッチング処理して多結晶状態がシリコン内部にどのように存在するのかを調べた。図10に示すように、照射間隔 $1\mu\text{m}$ 一方向と $10\mu\text{m}$ 格子状の加工条件において、レーザー照射面側の加工層境界付近でエッチングされた部分が面方向に連なっていることがわかった。この結果から、レーザー照射条件の選択により多結晶化された部分が面方向に連なって形成されることを見出した。

この多結晶状態、つまり面方向における連続加工層が形成される条件として加工ピッチを $1\mu\text{m}$ で加工した $10\text{mm}\times 10\text{mm}$ サイズの試料を用いて、加工層からの剥離を行った。剥離方法は基材ステンレス板 (SUS304) に加工試料を二液常温硬化型アクリル系接着剤で接着・挟持し、接着 \Rightarrow 剥離の作業を行った。剥離面には部分的に劈開されてしまった状態があり、これは加工痕の安定性が不十分であることが影響しているものと考えられる。

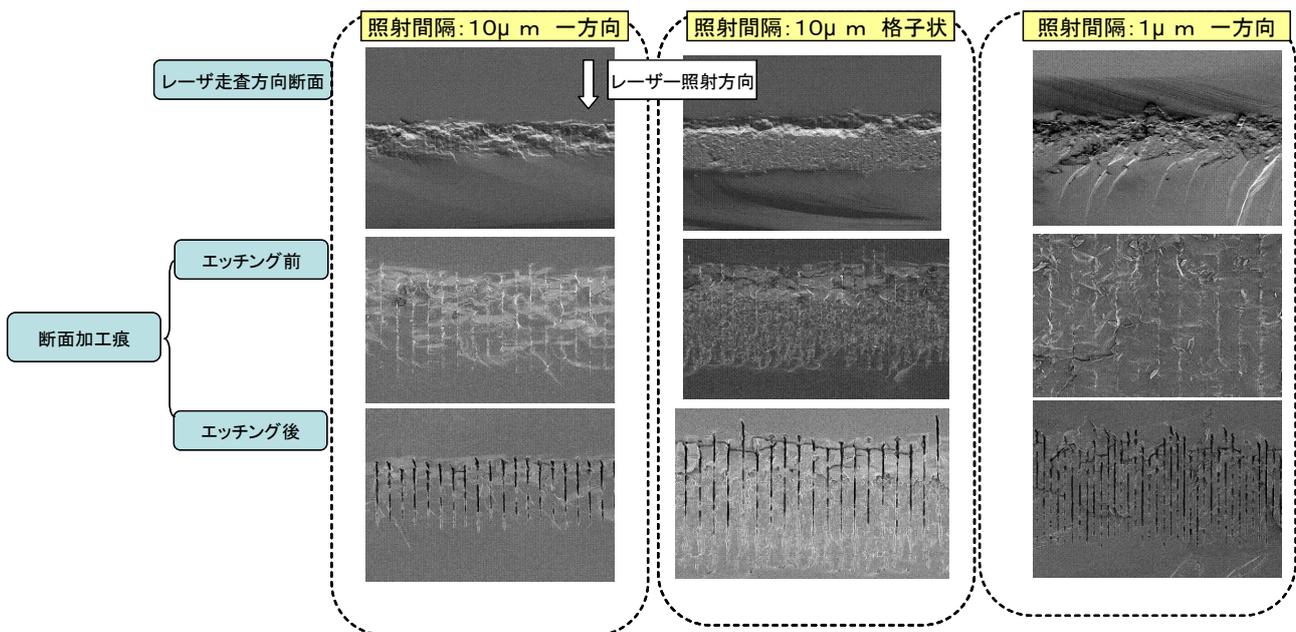


図10 エッチングによる加工痕形成状態の観察

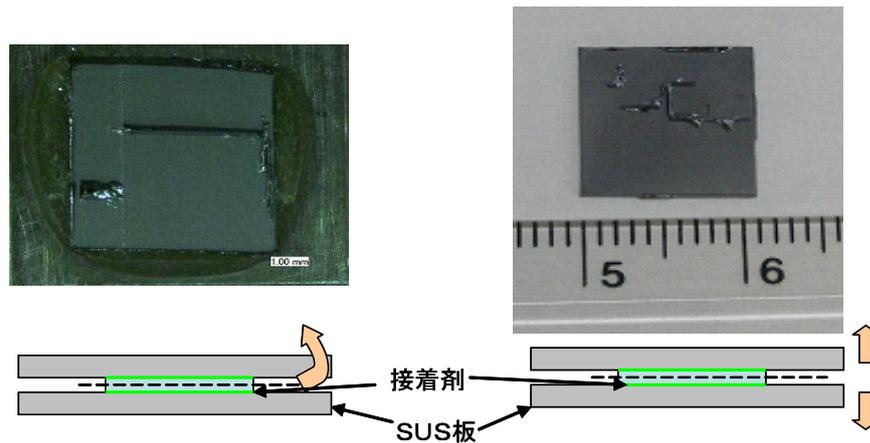


図11 剥離した試料の剥離面と剥離方法

加工層のどの部分からシリコンが割断・剥離するかを観察を行うため、シリコンの一部が残るように剥離試料を作成した。図12に示すように、加工層のレーザー照射方向側境界から剥離していた。これは、前述の多結晶領域が面方向に連なった状態と相関する。

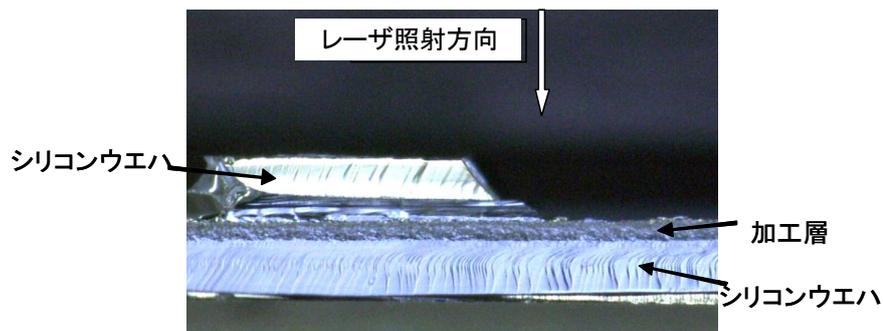


図12 剥離境界面の状態

表2 レーザー加工条件 ②

加工試料	単結晶シリコンウエハ 625 μm厚 面方位 (100)
レーザー発振器	LD励起 ファイバーレーザー
波長	1062 ± 2 nm
パルス幅	200 ns
繰り返し周波数	50 kHz
レーザー出力	0.7 W
対物レンズ	50倍/赤外光用
対物レンズ開口数NA	0.55
内部焦点	空气中でシリコン表面から 70 μm
ステージ送り速度	50 mm/s
加工ピッチ	1 μm

上記のように、加工層での剥離安定しないことを改善のため、加工条件①で使用したレーザー発振器よりも出力の安定したレーザー発振器を使用して表2に示す加工条件②で研究を行った。また、赤外光用対物レンズを使用し、可視光用レンズよりもレーザービームの透過率を向上させた。11mm×11mmサイズの試料を加工し剥離を行った結果、図13に示すように、均一に剥離することができた。

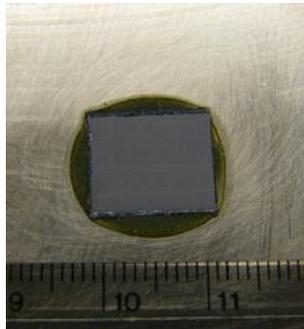


図13 加工条件②の試料の剥離面

加工条件②で使用した対物レンズは開口数NA=0.55のため、市販のNA=0.85の赤外光用対物レンズを使用した加工実験を行った。加工条件③として表3に示す。

加工条件③で加工した試料の加工痕長を調べた。その結果、加工条件①、加工条件②の加工痕長が100 μ m程度に対し、加工条件③では30 μ m前後と短くなることを確認した。

表3 レーザー加工条件 ③

加工試料	単結晶シリコンウエハ 625 μ m厚 面方位(100)
レーザー発振器	LD励起 ファイバーレーザー
波長	1062 \pm 2 nm
パルス幅	200 ns
繰り返し周波数	50 kHz
レーザー出力	0.7 W
対物レンズ	汎用 100倍/赤外光用 (シリコン収差補正環付)
対物レンズ開口数NA	0.85
内部焦点	空气中でシリコン表面から 70 μ m
ステージ送り速度	50 mm/s
加工ピッチ	1 μ m

加工条件③で加工した試料の剥離状態を図14に示す。11mm×11mmサイズの試料で、加工層からの剥離が可能であった。

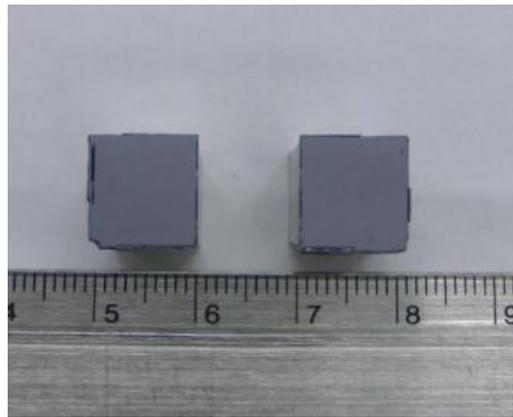


図14 加工条件③の試料の剥離面

また、図15に加工におけるレーザー加工方向の呼び名を表わした。レーザービーム走査方向をピッチ、走査ライン間隔をオフセットと称することとした。

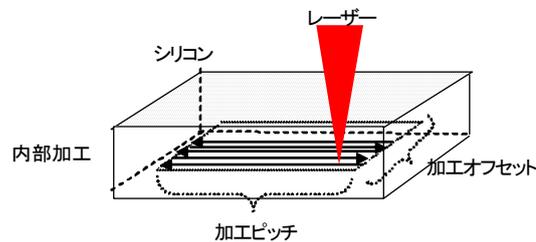


図15 レーザー照射方向の呼称

レーザー発振器選定のため、発振器メーカーからの無償貸与発振機および埼玉大学保有発振器を検討評価した。表4に検討機種を示した。

表4 レーザー発振器選定候補機種

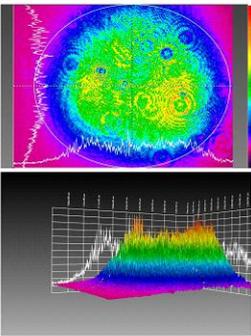
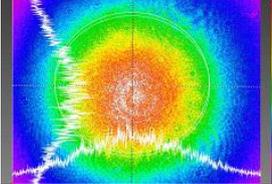
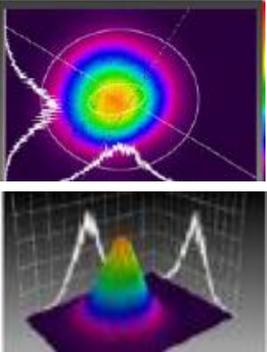
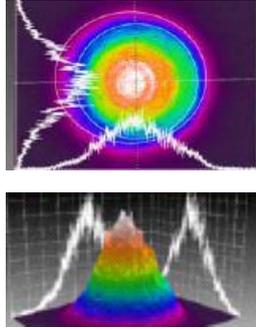
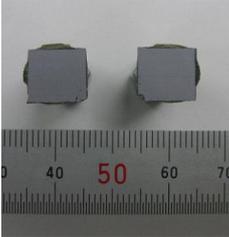
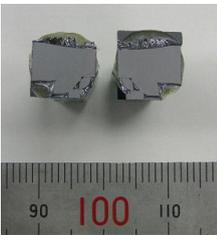
	①	②	③	④	⑤
メーカ	イエナオプティック		住友電気工業	スペクトラフィジックス	
機種名	JenLas fiber ns 20-Advanced single mode	JenLas fiber ns 20-Advanced multi mode	Sumilas	HIPPO 106QW	V-Xtreme1064-8
波長	1062nm	1062nm	1060nm	1064nm	1064nm
繰返し周波数	CW~1000KHz	CW~500KHz	100kHz~1000kHz	15kHz~300kHz	50kHz~500kHz
パルス幅	10~250ns	9~200ns	10~20ns	<15ns	~100ns
平均出力	>20W	>20W	>12W	>17W	>8W
M2	<1.3	<2	<1.3	<1.2	<1.2
備考	シングルモード・ ファイバーレーザー	マルチモード・ ファイバーレーザー	ファイバーレーザー	DPSSLレーザー	DPSSLレーザー
	実験済み	剥離実績あり	実験済み/高価格	実験済み	実験済み
機器状況	メーカ貸与(返却)	埼玉大学保有	メーカ貸与(返却)	埼玉大学保有	メーカ貸与(返却)

表5に4機種のレーザー機器のビームプロファイルと加工後の剥離結果を示す。表5からわかるように、ビームプロファイルがガウシアン分布であるSumilas（住友電工製）とHIPPO（スペクトラフィジックス製）では、加工後の剥離が得られなかった。

一方、ビーム品質がやや悪く、フラットな強度分布をもつJenLas fiber ns 20-Advanced multi mode機、また、ビーム径調整とアパーチャー挿入により、ガウシアン強度分布の中心

部を切りとってフラット化された fiber ns 20-Advanced single mode 機のビームでは、加工後に剥離することができた。平成22年度の研究成果として、剥離面は加工層のレーザー照射方向側境界から剥離することがわかっている。対物レンズの入射瞳径に対して、ビーム径の調整とアパーチャーの挿入により、ガウシアン強度分布の中心部のみを切りとってフラット化した強度分布のビームを対物レンズに入射すると、上記の加工領域境界での面方向加工状態が均一になることが考えられる。これに対し、ガウシアン分布のビームでは面方向での加工状態が不均一であることが考えられる。また、剥離可能なレーザー発振器の場合でも、加工面全体で剥離できない場合があり、これは実験に使用した加工ステージの移動精度の影響も無視できないと思われる。

表5 各種レーザー発振器のビームプロファイルと加工後の剥離状態

JenLas fiber ns 20-Advanced multi mode	JenLas fiber ns 20-Advanced Single mode	Sumilas	HIPPO 106 QW
			
			
<p>対物レンズ瞳径に対して、ビームエネルギー分布差のあるビームは、内部加工層での剥離が困</p>			

以上の実験結果から、試験試作装置に導入するレーザー発振器は、イエナオプティック社の JenLas fiber ns 20-Advanced single mode を選定した。これは、上記の加工実験結果および高出力、高繰返し周波数、パルス幅可変の性能を有していることで、加工高速化にも適応可能と判断したためである。

各要素技術が組み込まれた試験試作装置を使用して加工実験を行った。実施項目③で詳述するように、一般的な対物レンズを使用して高屈折材料であるシリコンの内部にレーザーを集光させると、十分な集光が得られないため加工領域（加工痕長さ）が長くなることと、集光点で十分な加工エネルギーが得られないことが生じる。一方、大きな加工エネルギーで集光すると、レーザー照射面側にクラックが伸張して割れてしまう不具合が生じていた。そこで、

シリコン内部加工用に特化して開発した集光光学素子（対物レンズ）の効果を評価した。また、組込まれた加工ステージの位置精度による加工領域の安定性も評価した。

対物レンズに具備した補正環による収差補正を行い、ライン加工による内部加工状態を確認した。赤外線透過光による顕微鏡画像から補正環を調整することでライン幅が拡大することがわかった。さらに、加工オフセットを従来の $1\mu\text{m}$ から拡大しても加工痕間に加工された領域が存在することが、加工断面のレーザー共焦点顕微鏡画像からわかった。このオフセット拡大は加工高速化に極めて有効である。従来は加工ピッチ $1\mu\text{m}$ 、加工オフセット $1\mu\text{m}$ の走査でのみ加工後の剥離可能であり、加工高速化手段としての高繰返し周波数と加工ステージの高速移動の組合せに限界があった。加工オフセットの拡大は、後述する加工高速化技術の開発における多点同時照射技術ともマッチングするものであり、この点でも有効である。図16に対物レンズ収差補正環調整位置とシリコンに内部加工された加工痕長とシリコン表面からの加工痕位置を示す。収差補正環を 0.3mm に調整して加工すると加工痕長さは $20\mu\text{m}$ となった。デフォーカス (DF) $60\mu\text{m}$ に対して加工痕深さは $300\mu\text{m}$ 付近であった。

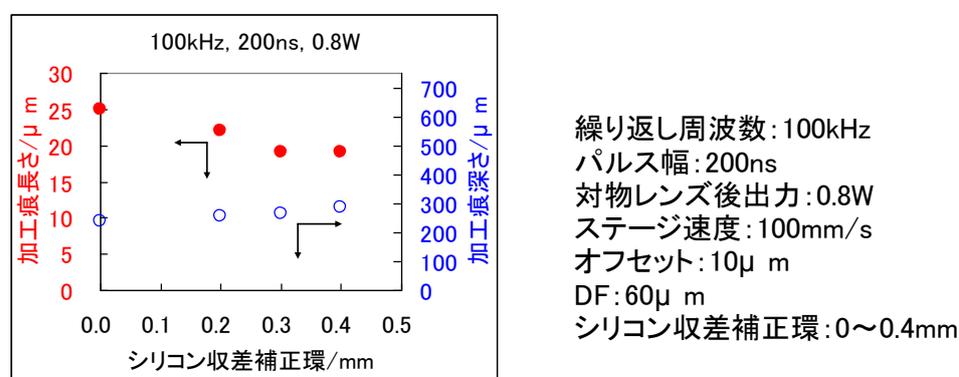


図16 対物レンズ収差補正と加工痕の関係

表6 加工ピッチ $2\mu\text{m}$ 、オフセット $2\mu\text{m}$ 加工シリコンの剥離結果

条件	100kHz, 200ns, 0.8W, 照射ピッチ $2\mu\text{m}$ /オフセット $2\mu\text{m}$, DF $60\mu\text{m}$, シリコン補正環 0.3mm DF調整後に補正環調整	100kHz, 200ns, 0.8W, 照射ピッチ $2\mu\text{m}$ /オフセット $2\mu\text{m}$, DF $60\mu\text{m}$, シリコン補正環 0.2mm DF調整後に補正環調整
	剥離荷重 590N	剥離荷重 424N
剥離面の様子		

表6に集光光学素子の補正環調整 0.2mm 、 0.3mm で照射ピッチ $2\mu\text{m}$ 、オフセット $2\mu\text{m}$ で加工した試料を剥離させた結果を示した。このように、照射間隔を拡げても剥離可能であることが確認できた。

これらの加工条件検討結果に基づき、 $50\text{mm}\times 50\text{mm}$ サイズのシリコンウエハに対して、加工ピッチ $2\mu\text{m}$ 、加工オフセット $2\mu\text{m}$ でレーザーを照射した結果、図17に示すよ

うに剥離することができた。

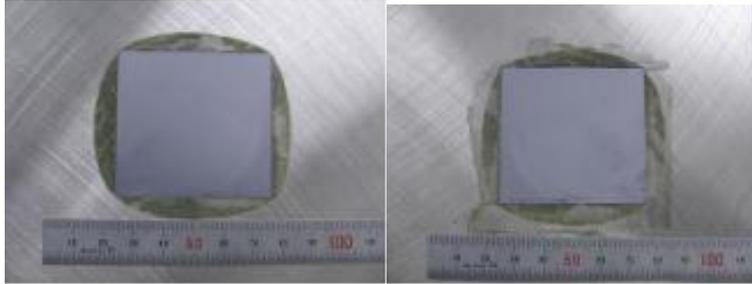


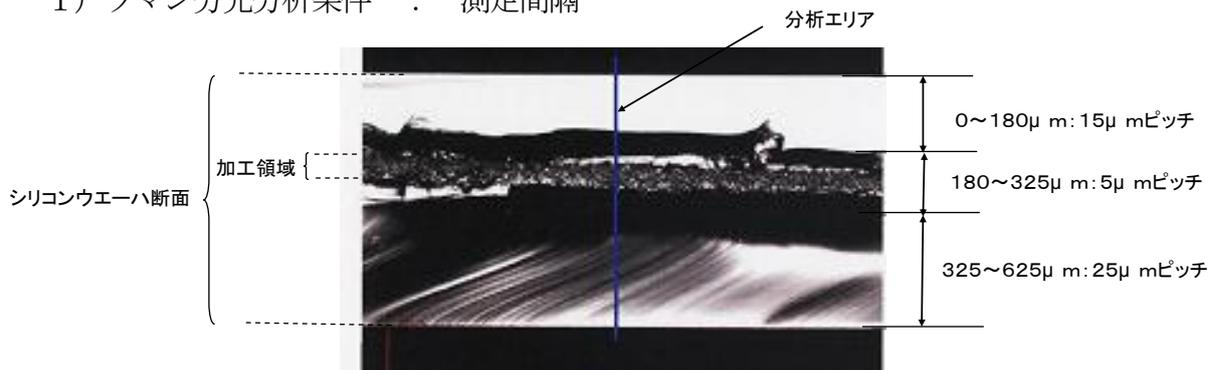
図17 50mm×50mmサイズで剥離されたシリコンウエハ

② 薄化ウエハの品質評価技術

シリコンウエハ内部へのレーザー照射により、レーザービームが透過した部分のウエハ品質に与える影響を解析した。上記した図9に示したようにエッチング処理後の加工断面を走査型電子顕微鏡(SEM)により観察したが、ビーム透過部分に欠陥などがみられず、レーザー照射による品質への影響がないことが分かった。

図18に加工条件①で加工した試料のシリコンウエハ断面方向の解析ラマン分光分析結果を示す。

1) ラマン分光分析条件 : 測定間隔



2) ラマン分光分析結果

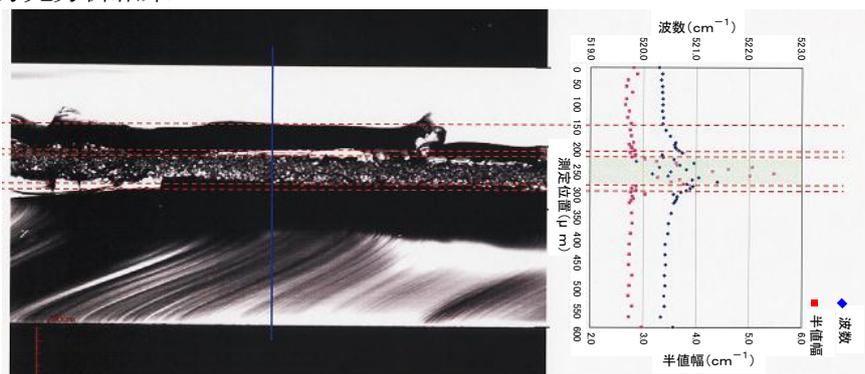
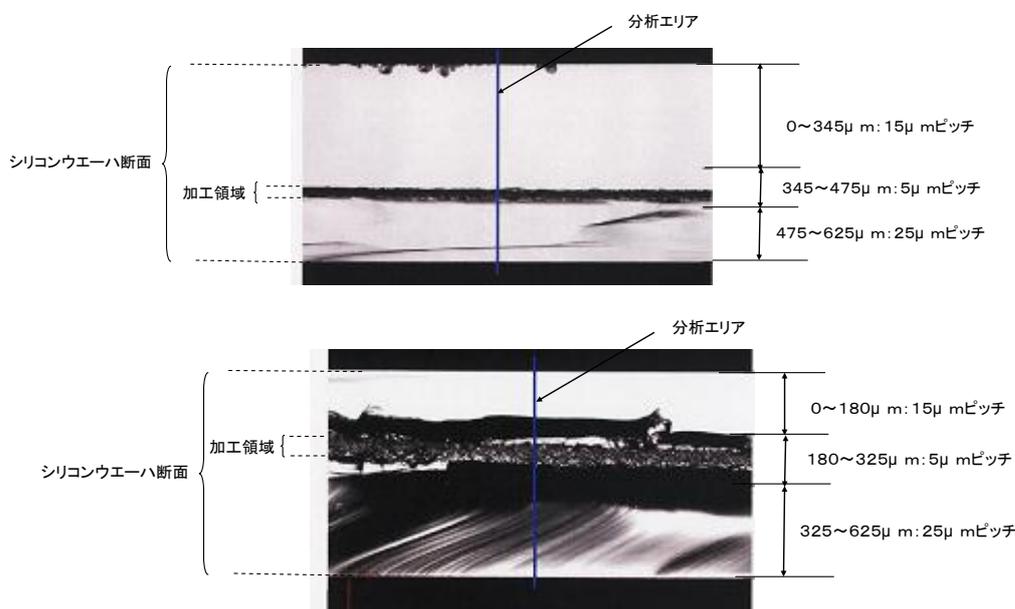


図18 加工条件①の試料に対するラマン分光分析

加工後のシリコンを段面方向に割断し、厚さ方向に対してレーザー照射側の試料表面から180 μ mまでを15 μ m間隔、加工層近傍と加工層に相当する180 μ m~325 μ mまでを5 μ m間隔、以降の325 μ m~625 μ mまでを25 μ m間隔で、それぞれ測定した。220 μ m~280 μ mの範囲において、半値幅の広がりが見られ、この範囲ではシリコン

ウエハが多結晶化していることが考えられる。多結晶領域の明確な切り分けは難しい。解析結果から、加工領域は多結晶状態で、圧縮方向の応力が生じていることが推測された。また、加工領域と非加工領域との境界の結晶状態の変化は緩やかであると考えられる。さらに、加工領域の断面方向で比較するとレーザー照射方向面側の方で多結晶化が進んでいることも考えられた。一方、レーザー透過部分は単結晶状態が維持されており、この結果からもレーザー照射による影響が無いことが分かった。図19に加工条件③で加工した試料のラマン分光分析結果を示す。加工後のシリコンを段面方向に割断し、厚さ方向に対してレーザー照射側の試料表面から345 μm までを15 μm 間隔、加工層近傍と加工層に相当する345 μm ～475 μm までを5 μm 間隔、以降の475 μm ～625 μm までを25 μm 間隔で、それぞれ測定した。390 μm ～425 μm の範囲において、半値幅の広がりが見られ、この範囲ではシリコンウエハが多結晶化していることが考えられる。この結果も同様に、多結晶領域の明確な切り分けは難しい。

1) ラマン分光分析条件 : 測定間隔



2) ラマン分光分析結果

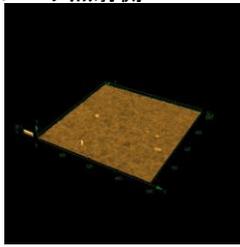
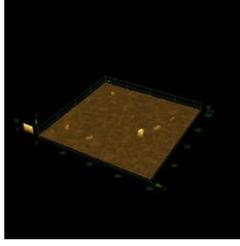
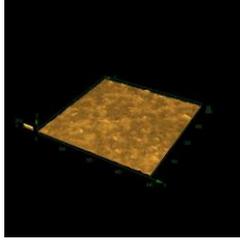
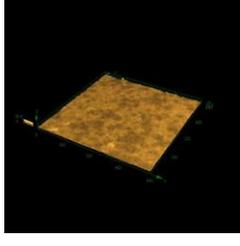


図19 加工条件③の試料に対するラマン分光分析

表7に剥離したシリコンウエハの表面粗さ測定結果を示す。レーザー照射条件は同一とし、対物レンズ補正環調整を0.2mm、0.3mmの2水準を示してある。表面粗さはR a = 0.7～0.8 μm 、R z = 5.0 μm 前後であり、それぞれの条件でレーザー照射側とス

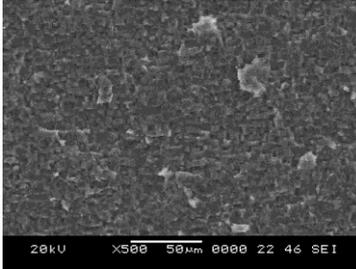
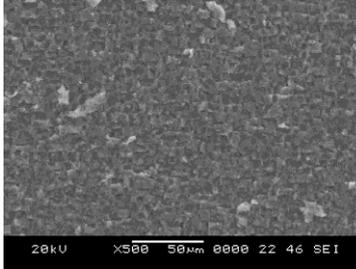
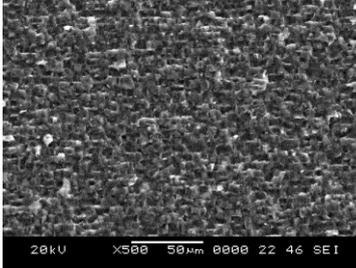
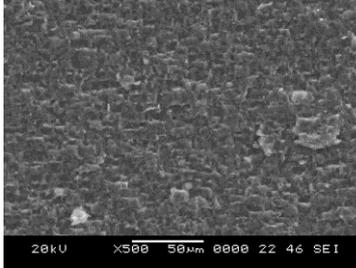
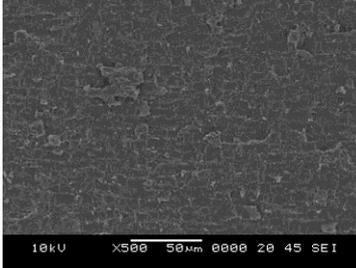
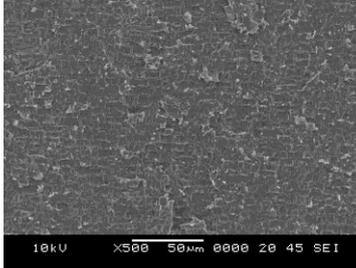
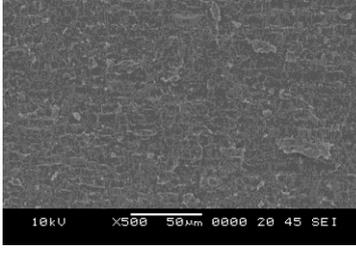
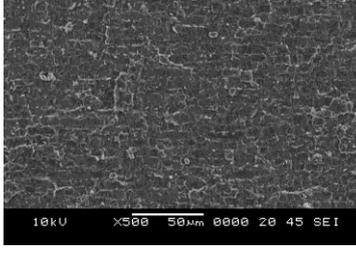
ステージ側での粗さの差が少ないことがわかる。

表7 剥離面の表面粗さ

加工条件	剥離面線粗さ測定																															
100kHz, 200ns, 0.8W, 照射ピッチ2μ m/オフセット2μ m, DF60μ m, シリコン補正環0.3mm DF調整後に補正環調整	レーザー照射側		<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>走査方向</th> <th>オフセット方向</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="4">Ra/μ m</td> <td>1</td> <td>0.720</td> <td>0.759</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>0.787</td> <td>0.728</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>0.804</td> <td>0.617</td> </tr> <tr> <td>平均値</td> <td>0.77</td> <td>0.70</td> </tr> <tr> <td rowspan="4">Rz/μ m</td> <td>1</td> <td>5.048</td> <td>4.872</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>4.629</td> <td>4.523</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>5.125</td> <td>4.060</td> </tr> <tr> <td>平均値</td> <td>4.93</td> <td>4.49</td> </tr> </tbody> </table>		走査方向	オフセット方向	Ra/μ m	1	0.720	0.759	2	0.787	0.728	3	0.804	0.617	平均値	0.77	0.70	Rz/μ m	1	5.048	4.872	2	4.629	4.523	3	5.125	4.060	平均値	4.93	4.49
		走査方向	オフセット方向																													
	Ra/μ m	1	0.720	0.759																												
		2	0.787	0.728																												
3		0.804	0.617																													
平均値		0.77	0.70																													
Rz/μ m	1	5.048	4.872																													
	2	4.629	4.523																													
	3	5.125	4.060																													
	平均値	4.93	4.49																													
ステージ側		<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>走査方向</th> <th>オフセット方向</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="4">Ra/μ m</td> <td>1</td> <td>0.765</td> <td>0.797</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>0.726</td> <td>0.727</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>0.765</td> <td>0.780</td> </tr> <tr> <td>平均値</td> <td>0.75</td> <td>0.77</td> </tr> <tr> <td rowspan="4">Rz/μ m</td> <td>1</td> <td>4.640</td> <td>5.477</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>4.467</td> <td>4.310</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>5.055</td> <td>5.502</td> </tr> <tr> <td>平均値</td> <td>4.72</td> <td>5.10</td> </tr> </tbody> </table>		走査方向	オフセット方向	Ra/μ m	1	0.765	0.797	2	0.726	0.727	3	0.765	0.780	平均値	0.75	0.77	Rz/μ m	1	4.640	5.477	2	4.467	4.310	3	5.055	5.502	平均値	4.72	5.10	
	走査方向	オフセット方向																														
Ra/μ m	1	0.765	0.797																													
	2	0.726	0.727																													
	3	0.765	0.780																													
	平均値	0.75	0.77																													
Rz/μ m	1	4.640	5.477																													
	2	4.467	4.310																													
	3	5.055	5.502																													
	平均値	4.72	5.10																													
100kHz, 200ns, 0.8W, 照射ピッチ2μ m/オフセット2μ m, DF60μ m, シリコン補正環0.2mm DF調整後に補正環調整	レーザー照射側		<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>走査方向</th> <th>オフセット方向</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="4">Ra/μ m</td> <td>1</td> <td>0.699</td> <td>0.949</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>0.662</td> <td>0.811</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>0.664</td> <td>0.761</td> </tr> <tr> <td>平均値</td> <td>0.68</td> <td>0.84</td> </tr> <tr> <td rowspan="4">Rz/μ m</td> <td>1</td> <td>4.116</td> <td>5.653</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>4.094</td> <td>5.563</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>4.551</td> <td>5.588</td> </tr> <tr> <td>平均値</td> <td>4.25</td> <td>5.60</td> </tr> </tbody> </table>		走査方向	オフセット方向	Ra/μ m	1	0.699	0.949	2	0.662	0.811	3	0.664	0.761	平均値	0.68	0.84	Rz/μ m	1	4.116	5.653	2	4.094	5.563	3	4.551	5.588	平均値	4.25	5.60
		走査方向	オフセット方向																													
	Ra/μ m	1	0.699	0.949																												
		2	0.662	0.811																												
3		0.664	0.761																													
平均値		0.68	0.84																													
Rz/μ m	1	4.116	5.653																													
	2	4.094	5.563																													
	3	4.551	5.588																													
	平均値	4.25	5.60																													
ステージ側		<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>走査方向</th> <th>オフセット方向</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="4">Ra/μ m</td> <td>1</td> <td>0.772</td> <td>0.866</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>0.812</td> <td>0.902</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>0.809</td> <td>1.039</td> </tr> <tr> <td>平均値</td> <td>0.80</td> <td>0.94</td> </tr> <tr> <td rowspan="4">Rz/μ m</td> <td>1</td> <td>4.799</td> <td>5.201</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>5.317</td> <td>5.519</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>5.227</td> <td>7.119</td> </tr> <tr> <td>平均値</td> <td>5.11</td> <td>5.95</td> </tr> </tbody> </table>		走査方向	オフセット方向	Ra/μ m	1	0.772	0.866	2	0.812	0.902	3	0.809	1.039	平均値	0.80	0.94	Rz/μ m	1	4.799	5.201	2	5.317	5.519	3	5.227	7.119	平均値	5.11	5.95	
	走査方向	オフセット方向																														
Ra/μ m	1	0.772	0.866																													
	2	0.812	0.902																													
	3	0.809	1.039																													
	平均値	0.80	0.94																													
Rz/μ m	1	4.799	5.201																													
	2	5.317	5.519																													
	3	5.227	7.119																													
	平均値	5.11	5.95																													

また、表8に剥離面のSEM画像を示す。

表8 剥離面のSEM画像

加工条件	SEM	
100kHz, 200ns, 0.8W, 照射ピッチ2 μm /オフセット2 μm , DF60 μm , シリ コン補正環0.3mm DF調整後に補正環 調整	レーザー照射側	
		
	ステージ側	
		
100kHz, 200ns, 0.8W, 照射ピッチ2 μm /オフセット2 μm , DF60 μm , シリ コン補正環0.2mm DF調整後に補正環 調整	レーザー照射側	
		
	ステージ側	
		

この剥離面は従来の加工実験結果と比較して、テクスチャー構造が形成されていることが特徴的である。従来の加工実験で剥離した表面は微細な多結晶粒界で構成されており、このようなテクスチャー構造は生じていない。また、テクスチャー構造は加工領域のレーザー照射側に存在する。これは、補正環による集光効果で、この部分の光エネルギーが高まり、熱

加工の効果が高まったものと思われる。このテクスチャー構造が形成された結果、この結晶面からの劈開によって剥離することが可能となり、剥離荷重の低減と剥離再現性が得られたものと考えられる。

③ シリコン内部を高精度に加工可能な光学技術の組込み開発

シリコンウエハのスライス加工を少ない材料ロス（切りしろ）で行なうことが実用上の課題であり、そのために、ウエハ内部における加工ビームの集光スポットサイズをできるだけ小さくする必要がある。材料内部のレーザー加工においては、加工ビームが大気中から材料内部へ入射する時に生じる屈折により、屈折率の大きい材料ほど、ビームの集光特性が劣化し、加工品質と加工効率の両者に悪影響を与える問題がある。また、切りしろを減らすために開口数の大きい集光系を用いるほど、この影響は顕著になる。

そこで、この課題を解決するために、シリコンウエハのレーザースライス用途に特化した、シリコン加工用光学機器を開発した。主な設計仕様を次表に示す。

表9 シリコン加工用光学機器の主な設計仕様

仕様項目	設計値
開口数	0.85
焦点距離	2 mm (±5%)
対応波長	1064 nm、可視
対象物	シリコン、石英
透過率	85%以上 (@1064 nm)
補正板厚	0～1 mm (電動)
分解能	0.75 μm (@1064 nm)
焦点深度	±0.6 μm (@1064 nm)
作動距離	1.5 mm以上

レーザー加工試験試作装置への導入にあたり、開発製作されたシリコン加工用光学機器の集光性能の評価を行なった。この評価のために、シリコン内部に形成した集光スポットプロファイルを測定できる光学系を構築した。この測定光学系を用いて、シリコン加工用光学機器の集光スポットプロファイルを評価した。

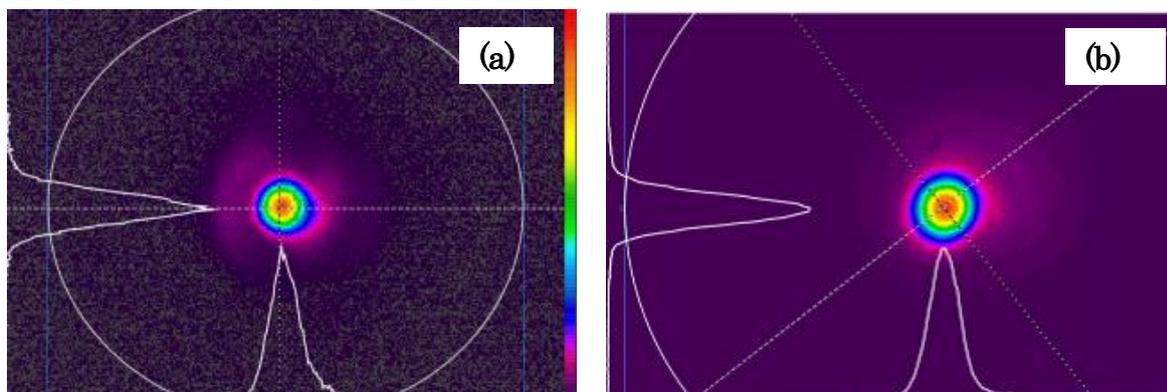


図20 シリコン加工用光学機器により、レーザー光(TEM₀₀モード)を、
(a)大気中、および(b)シリコン内部に集光した場合の集光スポットプロファイル
それぞれのスポットサイズは、(a)1.7 μmおよび(b)1.8 μm程度と見積もられた。

図20に示したように、ほぼ所望の性能が得られていることを確認できた。本光学機器を試験試作装置へ導入し、良好な内部加工状態が得られている。

④ 位置の安定化機構技術の組み込み開発

加工ビームの集光スポットの高精度制御を行なうと、加工対象のシリコンウエハのわずかな傾きや、加工ステージの動作ずれが加工精度に悪影響を与える可能性がある。これは内部改質層の形成位置や、加工品質を不均一にさせる可能性がある。集光スポットサイズはマイクロメートルオーダーと想定されるので、加工位置を同程度の精度で安定化させることが課題である。この問題を解決するために、ステージ装置の移動精度を補うための手段として、加工位置の安定化機構技術を開発した。これは、(1) 加工ビームの光軸とステージ装置の移動方向の位置関係を補正するためのウエハ傾き量の検出機構と、(2) 加工中に加工ビームの焦点位置をシリコンウエハ表面から一定の内部深さにアクティブに保持するためのオートフォーカス機構から成る。

まず始めに、傾き検出機構を試験試作装置へ適用した結果について述べる。加工対象であるシリコンウエハは、エアベアリングリニアステージ装置に設置された吸着テーブル上に固定された。このシリコンウエハの傾きを傾き検出機構により測定したところ、高速軸方向に約 $30\mu\text{m}$ 程度の傾きが発生していることを検出できた。これはオートフォーカス機構を使用すれば問題のない傾きであるが、吸着テーブルの下にシム板を入れることで調整を試みた。シリコン表面に集光したレーザースポットを観察しながら、ステージ装置を動作させて、そのスポットの変化が小さくなるように傾きの微調整を行なった。この調整の後にシリコンの内部加工を行なってウエハ断面を観測し、内部に形成された改質層の表面からの位置を測定することにより面内の傾きを評価した。その結果、十分な調整がなされていることを確認できた。以上のように、傾き検出機構を適用することによって、試験試作装置に設置されたステージ装置上のシリコンウエハの傾きを検出することができた。また、シム板を使ったシンプルな補正により、大面積の加工を行なうために十分な精度が得られることが分かった。

次に、オートフォーカス機構の組み込み動作確認を行なった。オートフォーカス機構は、可視波長の半導体レーザー (LD) による、非同軸反射方式である。フォーカスの再現性は、加工ビームのスポットサイズやその焦点深度に対して十分小さくなるように設計されている。まず LD 光をシリコンウエハの表面に照射し、その反射光を位置センサーで検出することにより、ウエハ表面の加工ビーム光軸方向の変位を検出する。そして、その変位量をキャンセルするように、シリコン加工用光学機器の位置をピエゾ素子で駆動させることにより、加工ビームの内部焦点を一定位置に保つ。試験試作装置へ導入したステージ装置を用いて、シリコンウエハを移動させながら加工を行ない、同機構の動作をテストした。その結果、当初の意図に反して内部の加工層の位置が一定の深度に保持されていないことが判明した。この原因は、加工ヘッドへのオートフォーカスユニットの取付け精度不足と、センサー部の光学調整不足の2つが主として挙げられる。前者はオートフォーカス用レーザー光 (とそのシリコン表面からの反射光) がシリコン加工用光学機器と物理的に干渉してしまうことによる。シリコン加工用光学機器はその特性のため、ワーキングディスタンスが 1mm 程度と非常に小さい。このため、AF 用プローブレーザーの光路調整に要求される精度が非常に高く、加工ヘッドへの取付け調整への要求精度が非常に厳密であることに起因する。検討の結果、AF 用レーザーの光軸が理想配置である設計値から 0.6 度傾くと、AF 用レーザー光とシリコン加工用光学機器とが干渉してしまうことが分かった。一方、後者は AF モジュール内の集光レンズとセンサーの位置関係の調整不足により、シリコンウエハ表面の実変位よりも、シリコン加工用光学機器の変位が大きく制御されてしまっていることによると考えられた。これら2つの不具合原因は、オートフォーカスユニットの設置調整と、ユニット内部の光学系調整をより厳密に行なうことによって解決が可能との見通しを得ている。一方で幸いなこと

に、導入したエアベアリングリニアステージ装置の移動精度により、オートフォーカス機構による能動的補正を行わない場合でも、剥離プロセスに必要な加工精度を確保できることを示す結果を得た。

⑤ 試験試作装置の設計と製作

シリコン加工用光学機器、レーザー評価用機器により評価選定されたレーザー機器、ステージ装置、除振装置などを組み込んだレーザー加工試験試作装置の詳細設計を行ない、組み上げを実施した。さらに、製作した制御用オリジナルソフトウェアと組み合わせて、加工条件の最適化研究を行なうための試験装置として加工評価グループへ提供された加工評価を行ないながら、生産性を向上させるための高機能化を行なった。

レーザー加工試験試作装置の概要を述べる。シリコンウエハ面内で2次的にレーザー照射を行なうために、ウエハを移動させるステージ装置には、レーザー照射工程に要求された移動精度と速度から、エアベアリングステージを採用した。材料サイズ100mmに対して移動速度300mm/secが得られる。ステージ装置を含む各要素は、基盤材となる除振装置上に構築された。装置全体の安定化のために装置全体の重心をできるだけ下げること、また安全管理上、加工ビームの光軸をできるだけ低い位置にすることを目的として、除振装置のハニカム構造を一部取り除き、ステージ装置を落とし込む構造を採用した。加工光源となるレーザー機器は、レーザー評価用機器による、レーザー出力安定性、レーザー出力分布(横モード)、パルス波形とパルス幅、パルス列安定性などの評価結果と、加工および剥離テストの結果を総合的に考慮して選定された。

レーザー加工試験試作装置は、平成23年度目までは、主にシングルビーム加工機として加工条件の最適化研究で使用された。平成24年度は、生産性を向上させるために、3台のレーザー機器と3台の多点同時照射用加工ヘッドを用いた光学系の再構築により、15ビーム加工機へ高機能化させた。3台のレーザー機器を除振装置のハニカム定盤上に配置し、これらの駆動に必要なエレクトロニクス部品も各レーザー機器の周囲に設置させる構成とした。レーザー光は光ファイバーにより、シリコン加工用光学機器および同軸観察系などからなる加工ヘッドの近くまで伝送され、ビームサイズ調整後に加工ヘッドへ導入される。レーザー光は、加工ヘッド内で多点同時照射のためのビーム分岐と、内部加工のための球面収差補正をされたのちに、シリコンウエハに照射された。レーザー加工試験試作装置を金属パネルで覆う構成とすることで安全化対策を施した。被加工材料の設置と、加工ヘッドへの調整用アクセスは、シャッター構造のアクセスパネルから行なう構造とした。また、このレーザー加工試験試作装置を制御するために、専用オリジナル制御ソフトウェアを構築した。これにより、レーザー機器、ステージ装置の設定と制御、加工レシピおよびプログラム運転の設定管理などを行なうことができる。製作されたレーザー加工試験試作装置の外観写真を図21に示す。



図 2 1 シリコンウエハスライス用レーザー加工試験試作装置の外観写真。

⑥ 加工高速化機器の組み込み開発

本提案技術の実用化のキーポイントはレーザー加工時間の短縮にあると考え、加工高速化機構の組み込み技術の開発を実施した。加工時間を短縮させるため、そのベースとなりうる幾つかの手法を検討した。これと加工条件の最適化研究で得られた結果をあわせて考慮し、マルチビーム化による多点同時加工手段を採用した。この手法を用いた加工高速化用機器の設計と、レーザー加工試験試作装置への組み込みを実施した。詳細を以下に述べる。

多点同時加工手段として、マイクロシリンドリカルレンズアレイ (MLA) と、回折光学素子 (DOE) の2つのビーム分岐手段を検討した。これらの手段の概要を図 2 2 に示す。なお、光学系は簡単化して描かれている。

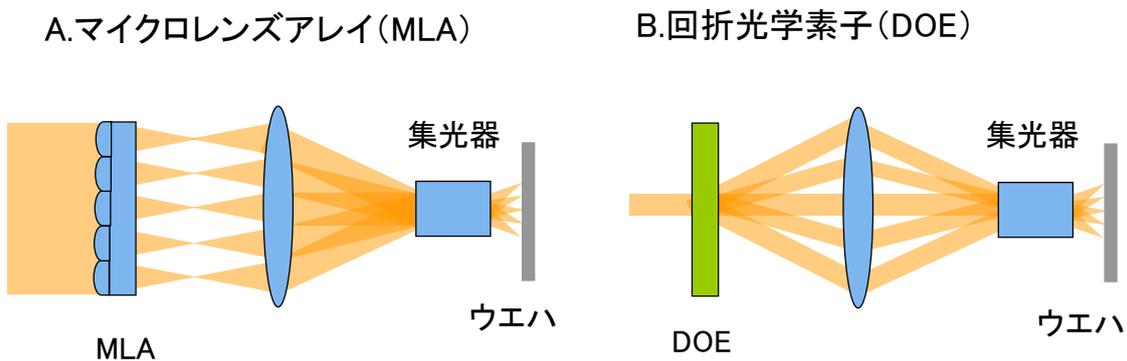


図 2 2 検討した 2 つの多加工点化手段の概要

MLA と DOE 分岐ともに加工ビームを複数に分割させる。前者は加工ビームを空間分割するのに対し、後者は回折分岐することで、加工点での集光スポットを多点化させる特徴を持つ。

どちらの手法が有効かを判断するために、光学系の評価、テスト加工ユニットの設計、製作

および内部加工実験を行なった。ここでは、5分岐のDOEについての評価結果を述べる。波長 $1.06\mu\text{m}$ に対して透過率95%程度が得られた。DOEにより分岐されたビーム毎の光強度を測定した結果を図23に示す。光強度はほぼ同程度に分配されていることがわかった。

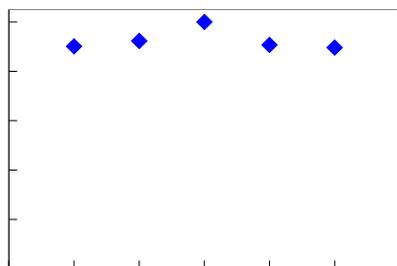


図23 5分岐のDOEを用いて形成された分岐ビーム毎の強度分布
0次光(分岐ビーム番号3)の強度を基準に規格化されている。

次に、この素子へガウシアンビームを入射させ、生成された分岐ビームをレンズで集光した際の、集光スポットプロファイルを計測した結果を図24に示す。これから、分岐ビームをレンズで集光した場合に、すべての分岐ビームについてガウシアン状の集光スポットが得られることを確認できた。各ビームに、集光プロファイルの大きな差異や崩れは見られない。

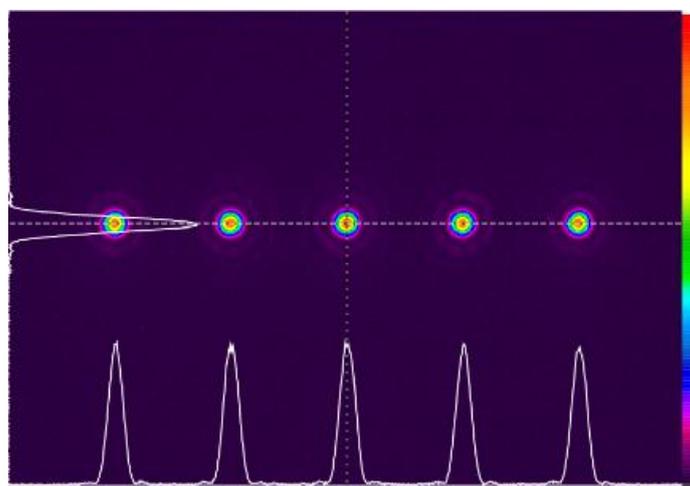


図24 DOEによる分岐ビームを集光した場合のプロファイル

この5分岐のDOEを用いた多点同時照射テストユニットを製作し、初期的な内部加工テストを行なった結果を図25に示す。シリコンウエハ内部に、分岐ビーム数に対応する5個の内部加工痕の同時形成を確認できた。

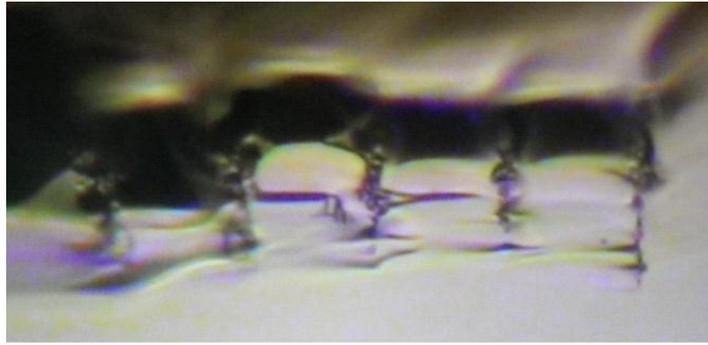
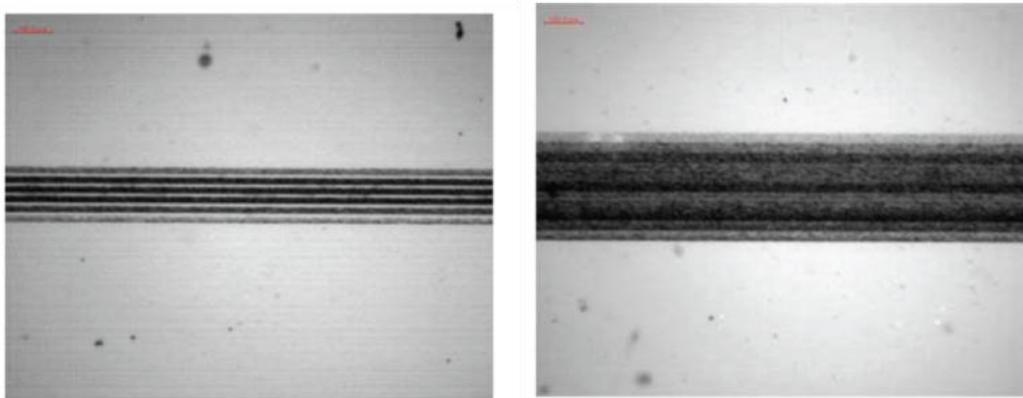


図25 分岐数5のDOE光学系を用いてシリコンウエハ内部へレーザー照射を行なった後に、ウエハを切断し、その断面を顕微鏡観察した写真。

次に、MLA分岐手段についても、同様の評価と内部加工テストを行なった。その結果、DOE分岐は、MLA分岐と比較して、多くのメリットを有することがわかった。そのうちの主なものを記す。(1) 実効的な加工効率が高いので入射光強度を低減でき、集光光学系への熱負荷を減らせる。(2) 素子へのビームの入射条件(入射位置、ビーム径、入射角度)に対するアライメントに厳密さは要求されない。(3) 生成される分岐ビームは入射ビームとほぼ同じガウシアンであり、分岐ビーム毎の大きな違いは見られない。(4) レンズ絞り径とビーム径の関係に関して、従来のシングルビーム加工と同様の感覚でよい。(5) 集光レンズの熱影響の検証と対策をやり易い。(6) 分岐スポット数にある程度の選択の自由度がある。

以上の比較評価より、DOE分岐がMLA分岐に対して有利であることを確認できたので、この分岐手段を試験試作装置への組み込むための加工高速化用機器の設計検討を行なった。分岐DOEを用いた多点同時照射用加工ユニットを3台設置し、3台のレーザー機器と組み合わせる構成とした。これにより、昨年度までの1ビーム加工から、最大15ビーム加工を同時に行なえるように高機能化された。

テスト加工用ユニットをレーザー加工試験試作装置へ移設し、高移動精度のステージと組み合わせて加工評価実験を行なった。これは加工条件の最適化研究にて行なわれたが、説明の関係上から以下に述べる。MLA分岐では図26に示すように、分岐スポット毎の強度差が大きいことから、レーザー光の入射パワーに対して加工に寄与するビーム数の変化と強度のばらつきによる不安定な加工状態となることが明らかとなった。図26(a)は分岐スポット毎の加工状態の透過赤外光による顕微鏡画像である。図26(b)は各分岐スポットで面状にレーザーが照射された透過赤外光顕微鏡画像である。分岐ビームにより加工状態が異なっていることがわかる。すなわち、MLAの場合は面加工での均一な加工状態は得られず加工高速化手段として適当でない判断された。



(a)

(b)

図26 MLAによる加工 透過赤外光顕微鏡による観察

次に、5分割のDOE分岐ビームによる加工実験結果を図27に示す。この図から5分岐されたビームがほぼ同程度の加工状態に寄与していることがわかる。

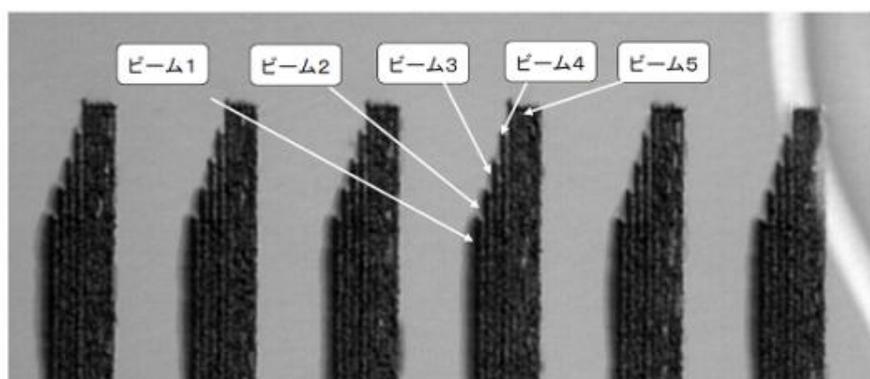


図27 5分割DOE分岐ビームによる加工状態

この5分割DOE分岐ビームを用いて加工条件を検討した。レーザー加工条件を表10に示す。レーザー出力は従来の単レンズ加工に対応した出力に調整し、パワーロスも考慮する必要がある。

表10 5分割DOE分岐ビームでの加工条件(1)

発振周波数 kHz	100
発振器出力 %	100
ステージ送り速度 mm/s	200
デフォーカス μm	60
補正環調整 μm	0.3
加工オフセット μm	2
加工ライン数	10

さらに、この加工試料を従来の方法により剥離することを試みた。その結果、剥離することができ、これまでの単レンズ加工による結果が反映された。剥離後の試料表面のSEM画像を図28に示す。

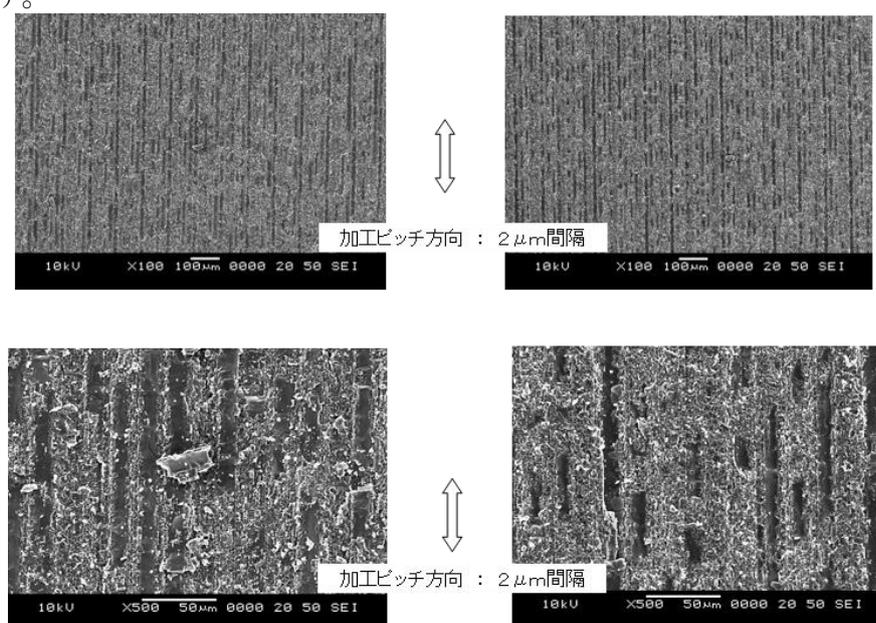


図28 剥離後のシリコン表面のSEM画像

剥離面から、従来の単ビーム加工では見られない分岐ビームの影響が生じていることが考えられるが、剥離に対する影響は生じていない。また、分岐ビームによる照射間隔を調整することによりこの状態は改善することが可能であると考えられている。以上の加工試験結果から、加工高速化の手段としてDOEによる分岐ビームは利用可能であることが確認された。DOEによる多点同時照射用加工ユニット部は図2-1に示した試験試作装置に組み込まれた。

第3章 総括

3-1 研究開発成果

本研究開発で計画した、シリコン内部加工技術の研究開発に関わる①加工条件の最適化研究および②薄化ウエハ品質評価技術、試験試作装置の開発に関わる③シリコン内部を高精度に加工可能な光学技術の組み込み開発、④試験試作装置の設計と製作および⑤加工高速化機構の組み込み開発、⑥加工高速化機構の組み込み開発は、計画に従い実施し、掲げた目標をほぼ達成することができた。

⑧ 加工条件の最適化研究

平成22年度に埼玉大学の加工試験機を利用した基礎検討を行い、剥離に適した加工条件を検討した。この検討結果を平成23年度から計画に従い導入された試験試作装置を利用した加工条件の最適化研究に展開し、加工層10数 μm で剥離可能な条件を明らかにした。導入された加工高速化技術である多列照射においても、この結果を反映させることができた。剥離応力低減に対する加工条件の許容範囲設定が課題として残っているが、基本条件を把握できたことで、今後の検討により明確にすることが可能であると考えられる。

⑨ 薄化ウエハ品質評価技術

加工層のラマン分光分析により、非加工領域の単結晶状態維持、加工領域の多結晶化と応力状態を明らかにした。レーザー光透過による品質への影響はほとんどないと考えられた。一方、剥離後のシリコンウエハ品質評価には至っておらず、今後の調査項目として確認が必要である。

⑩ シリコン内部を高精度に加工可能な光学技術の組み込み開発

シリコンウエハのレーザースライス用途に特化した、シリコン加工用光学機器を開発し、試験試作装置への組み込み加工実験によって所望の性能が得られていることを確認できた。

⑪ 位置の安定化機構技術の組み込み開発

加工位置の安定化機構技術を開発した。これは、(1)加工ビームの光軸とステージ装置の移動方向の位置関係を補正するためのウエハ傾き量の検出機構と、(2)加工中に加工ビームの焦点位置をシリコンウエハ表面から一定の内部深さにアクティブに保持するためのオートフォーカス機構から成る。傾き検出機構を適用することによって、試験試作装置に設置されたステージ装置上のシリコンウエハの傾きを検出することができた。また、シム板を使ったシンプルな補正により、大面積の加工を行なうために十分な精度が得られることが分かった。オートフォーカス機構は、加工ヘッドへのオートフォーカスユニットの取付け精度不足と、センサー部の光学調整不足の2つが主な原因とする不具合が判明した。一方で、導入したエアベアリングリニアステージ装置の移動精度により、オートフォーカ

ス機構による能動的補正を行なわない場合でも、剥離プロセスに必要な加工精度を確保できることを示す結果を得た。

⑫ 試験試作装置の設計と製作（実施：㈱ラステック）

シリコン加工用光学機器、レーザー評価用機器により評価選定されたレーザー機器、ステージ装置、除振装置などを組み込んだレーザー加工試験試作装置の詳細設計を行ない、組み上げを実施した。さらに、製作した制御用オリジナルソフトウェアと組み合わせ、加工条件の最適化研究を行なうための試験装置とし利用し、加工評価を行ないながら、生産性を向上させるための高機能化を行ない、装置を完成させた。

⑬ 加工高速化機構の組み込み開発

加工時間を短縮させるため、加工高速化機構の組み込み技術の開発を実施した。加工条件の最適化研究で得られた結果をあわせて考慮し、マルチビーム化による多点同時加工手段を採用した。この手法としてマイクロシリンドリカルレンズアレイ（MLA）と、回折光学素子（DOE）の2つのビーム分岐手段を検討した結果、DOE分岐がMLA分岐に対して有利であることを確認し採用した。この分岐DOEを用いた多点同時照射用加工ユニットを3台設置し、3台のレーザー機器と組み合わせる構成とした加工高速化用機器の設計と、レーザー加工試験試作装置への組み込みを実施した。

⑭ プロジェクトの管理・運営（実施：財団法人埼玉県中小企業振興公社）

平成22年度から平成24年度に亘る戦略的基盤技術高度化支援事業、「シリコンウエハのスライス加工に対応したレーザー加工システムの開発」に関わる研究開発委員会を適宜開催し、㈱ラステック、信越ポリマー㈱、埼玉大学、埼玉県産業振興公社の四者で研究進捗状況を協議しながら研究開発を進めた。

3-2 研究開発後の課題

目標とする試験試作装置の開発は達成したが、スループットの向上に限界が認められた。この改善には、加工条件におけるレーザー照射間隔の拡大および多列照射の効果的活用が求められる。これまでに得られたレーザー加工条件から、シリコン内部の加工状態と剥離荷重および剥離後のウエハ表面状態の関係は把握できている。従って、この成果を反映させてより高スループット化に向けた検討が必要である。

また、本研究開発はシリコンウエハのスライス加工を目標としてスタートしたが、この成果はシリコン以外の素材への応用展開が可能な技術であり、より付加価値を高めた加工技術ならびに加工システムとして構築する必要がある。

3-3 事業化展開

事業化展開については、本加工技術が全く新規なものであることから、川下ユーザーへの広報と認知作業が重要である。これまで、埼玉大学による展示会での紹介、セミナーおよび取材による新聞掲載などが行なわれており、関連する業界の複数企業からの問合せが来ている。本事業終了後も、研究体制における役割分担をさらに明確にして、こうした引合いに対応していくことで、川下ユーザーによる本加工技術の利用方法や価値の見極めを平成25年度に行いたい。その後、具体的な対応を図ることで加工装置およびシステムの製造販売を目指す。さらに、上記したようにシリコン以外の素材への展開も具体的に進めて行きたい。

〈終わりに〉

本研究開発成果の目標達成に向けて、本研究体制に参加、協力をいただいた各機関の研究者ならびに関係者の方々にお礼を申し上げますとともに、本事業推進の機会を与えていただいた関東経済局に感謝いたします。

以上